

УДК 621.311.25

А. В. Ефимов, Т. В. Потанина

Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»

# Методы и модели автоматизированного распределения нагрузок между энергоблоками АЭС на основе их эксплуатационных характеристик

Рассмотрены вопросы совершенствования методов, моделей и программного обеспечения для автоматизированного управления распределением нагрузок между паротурбинными энергоблоками АЭС с целью повышения надежности и среднеэксплуатационной тепловой экономичности АЭС.

**Ключевые слова:** автоматизация процесса управления распределением нагрузок, имитационная модель энергоблока АЭС, эксплуатационные характеристики.

О. В. Єфімов, Т. В. Потаніна

**Методи і моделі автоматизованого розподілу навантажень між енергоблоками АЕС на основі їх експлуатаційних характеристик**

Розглянуто питання удосконалення методів, моделей та програмного забезпечення для автоматизованого керування розподілом навантажень між паротурбінними енергоблоками АЕС з метою підвищення надійності та середньоексплуатаційної теплової економічності АЕС.

**Ключові слова:** автоматизація процесу керування розподілом навантажень, імітаційна модель енергоблока АЕС, експлуатаційні характеристики.

© А. В. Ефимов, Т. В. Потанина, 2010

Одним из принципов, закладываемых в стратегию развития ядерной энергетики в разных странах мира, является планирование не только базовых режимов работы энергоблоков АЭС, но и обеспечение возможности их работы в режиме регулирования суточного графика энергопотребления в энергетических системах. Так, требования европейских энергокомпаний EUR к стандартному проекту новых строящихся АЭС предусматривают увеличение маневренности энергетического оборудования и возможность работы энергоблоков в диапазоне нагрузок 30–100 % от номинальной мощности (со скоростью изменения нагрузок, составляющей 3 % номинальной мощности в минуту) с обеспечением всех критериев безопасности. Эффективной и безопасной эксплуатации АЭС в таком режиме можно достичь с помощью автоматизации процесса управления распределением электрических нагрузок между энергоблоками с учетом их функционального состояния. Это требует совершенствования математического и алгоритмического обеспечения, находящегося в распоряжении АСУ ТП энергоблоков АЭС.

Существующий в последние годы профицит производства электроэнергии в Украине и возможная перспектива подключения АЭС Украины к энергетическим системам европейских государств также подтверждают актуальность проблемы выбора оптимальных стратегий при управлении режимами работы энергоблоков АЭС, в частности проблемы оптимального распределения нагрузок между ними с целью повышения среднеэксплуатационной тепловой экономичности электростанций.

Таким образом, разработка методов и моделей для автоматизированного оптимального распределения нагрузок между энергоблоками АЭС, которые бы учитывали реальное состояние оборудования в процессе эксплуатации, с целью их применения при синтезе многофункциональных и всережимных АСУ ТП нового поколения энергоблоков АЭС Украины повышенной безопасности и повышения за счет этого маневренности и среднеэксплуатационной тепловой экономичности АЭС, является актуальной.

## Имитационная модель энергоблока АЭС с ВВЭР-1000

Задача распределения нагрузок между энергоблоками АЭС относится к основным оперативно-диспетчерским распределительным задачам. Она может быть решена в виде выдачи рекомендаций оперативному персоналу или в виде автоматических воздействий на систему управления мощностью энергоблоков на основе текущей информации о состоянии технологического оборудования. Параметры и характеристики систем и оборудования энергоблоков электростанций, элементов их тепловых схем изменяются в процессе эксплуатации в результате действия различных возмущающих факторов. Основными из них являются: энергосистемные условия, определяющие график электрической нагрузки во времени; условия отпуска теплоты посторонним потребителям; условия циркуляционного водоснабжения; эксплуатационные ухудшения характеристик оборудования; показатели надежности основного и вспомогательного оборудования и ряд других. Оценить результаты воздействия перечисленных факторов на основные технико-экономические показатели выработки электрической энергии (электрической мощности, удельного расхода теплоты на выработку электрической энергии, удельного расхода пара и пр.) позволяют эксплуатационные

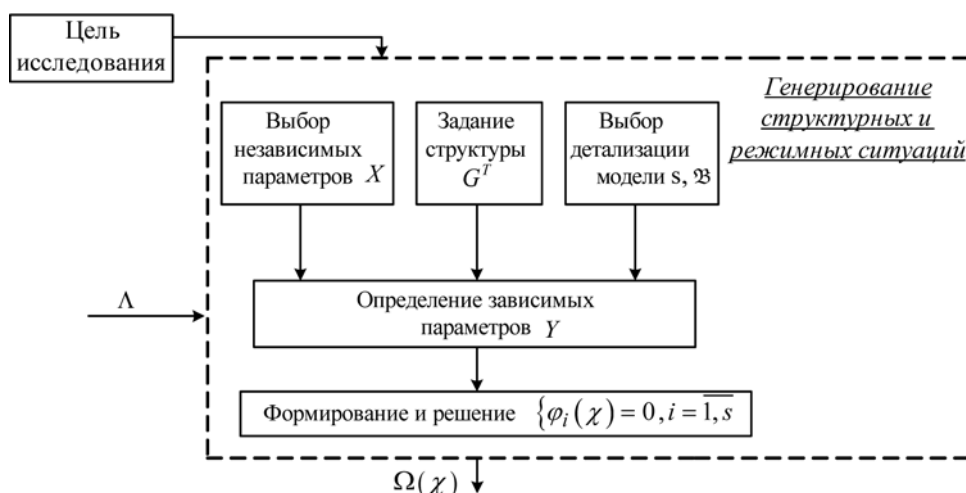


Рис. 1. Схема имитационной модели энергоблока АЭС с ВВЭР-1000

(энергетические) характеристики энергоблоков, описывающие влияние изменения параметров технологических процессов, т. е. оборудования, на значения электрической мощности и удельного расхода теплоты.

Для построения моделей эксплуатационных характеристик и критерия оптимального управления энергоблоком необходимо знание моделей технологических процессов и состояния оборудования. При формировании моделей основного и вспомогательного оборудования энергоблоков АЭС следует учитывать тот факт, что различному уровню детализации математических моделей энергетического оборудования соответствует разный объем параметров, измеряемых контрольно-измерительными приборами: более детальная математическая модель оборудования часто приводит к росту составляющей погрешности результатов расчетов при использовании этих математических моделей в составе АСУ ТП энергоблоков (так как увеличивается доля методических погрешностей). В ряде случаев приближенные, но более простые алгоритмы обеспечивают более экономную и надежную систему краткосрочного и среднесрочного управления энергоблоком в процессе эксплуатации (в режиме of line) с сокращенной длительностью ее подготовки и освоения. Этот методический подход и был положен в основу разработанных математических моделей проточной части конденсационной турбины насыщенного пара типа К-1000–60/1500, парогенераторов типа ПГВ-1000, систем конденсации и регенерации, достаточно хорошо описанных в [1]–[3].

В основе построения имитационной модели энергоблока лежит принцип структурного представления схемы энергоблока, при котором образуются структурные блоки, формируются объекты, с помощью которых описывается основное технологическое оборудование и которые находятся в иерархическом подчинении. Тепловая схема энергоблока, являющаяся его важнейшей системной характеристикой, при имитационном моделировании представляется ориентированным технологическим графом  $G^T$  [2] (рис. 1).

Узлы графа — технологическое оборудование, входящее в состав тепловой схемы. Ориентация дуг графа совпадает с направлением движения рабочих веществ и теплоносителей и передачи механической, тепловой и электрической энергии в технологических связях энергоблока.

Имитационная модель представляется следующим образом:

$$\{\Omega(\chi) | \varphi_i(\chi) = 0, \chi \in M, i = \overline{1, s}\}, \quad (1)$$

где  $\Omega(\chi)$  — показатели эффективности энергоблока как технической системы;  $\varphi_i(\chi)$  — функциональные отношения, описывающие технологические процессы (уравнения термодинамики, гидравлики, тепломассообмена, уравнения состояния воды и водяного пара, кинематических и теплофизических свойств рабочих веществ и теплоносителей, конструктивные и технико-экономические зависимости);  $s$  — число отношений в имитационной модели;  $\chi = \langle X, Y, G^T, \Lambda, A \rangle$  — информационная структура имитационной модели, в которой  $X$  — вектор независимых параметров оборудования энергоблока,  $Y$  — вектор зависимых параметров оборудования энергоблока,  $G^T$  — технологический граф,  $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_r)$  — вектор параметров, описывающих влияние внешних условий эксплуатации энергоблока (энергосистемные и климатические условия),  $A$  — вектор параметров, описывающих уровень детализации имитационного моделирования;  $M$  — область всевозможных функциональных состояний оборудования энергоблока, которые могут быть описаны с помощью имитационной модели.

Состав отношений в (1) зависит от структуры тепловой схемы энергоблока, т. е. от логической информации, описываемой с помощью технологического графа, а также от целей решаемых задач. Изменением параметров оборудования и структуры тепловой схемы имитируются различные эксплуатационные состояния энергоблока.

Общая схема имитационной модели энергоблока АЭС представлена на рис. 1. Имитационная модель энергоблоков АЭС (1) организована в виде следующих операторов: оператора сохранения количества вещества, оператора теплового процесса, оператора давлений, оператора сохранения энергии, оператора коэффициента полезного действия, оператора эффективности. Операторы принимают конкретные числовые значения в зависимости от логической информации, содержащейся в структуре технологического графа  $G^T$ , а их состав, количество и порядок зависят от структуры тепловой схемы энергоблока и целей использования модели.

Имитационная модель энергоблока кроме набора операторов, которые определяются информационной структурой модели  $\chi$ , содержит совокупность методов решения задач расчетов.

С помощью имитационной модели энергоблока осуществляется имитация различных функциональных состояний энергоблока путем изменений параметров оборудования и структуры тепловой схемы (выбор независимых

параметров  $X$ , структуры  $G^T$ , уровня детализации  $s$ ,  $A$ ). Этот оператор с помощью множества формализованных математических процедур может осуществлять целенаправленные изменения всех числовых и логических переменных информационной структуры модели  $\chi$ . В его состав также входят методы решения задач нелинейного программирования, методы планирования эксперимента и статистической обработки его результатов (регрессионный и дисперсионный анализ данных), методы идентификации математических моделей оборудования и др.

### Интегральные эксплуатационные характеристики энергоблоков АЭС с реактором ВВЭР-1000

С помощью имитационной модели энергоблоков АЭС могут быть решены различные задачи управления режимами работы энергоблоков во время их эксплуатации, в частности актуальная задача анализа влияния параметров оборудования, структуры тепловых схем и внешних условий эксплуатации на показатели эффективности работы энергоблоков, т. е. задача определения эксплуатационных характеристик вида:

$$\Omega(\chi) = f(X, Y, G^T, \Lambda, A), \quad (2)$$

а также на их основе задача оптимального распределения электрических и тепловых нагрузок во времени  $t$  между  $n$  энергоблоками электростанций в зависимости от технического состояния их оборудования с целью достижения оптимальных показателей эффективности работы всей электростанции  $\Omega_\Sigma$ :

$$\Omega_\Sigma = \text{extr} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Omega_i (X_i(t), Y_i(t), G_i^T(t), \Lambda_i(t), A(t) = \text{const}) \right], \quad (3)$$

где  $\Omega_i (X_i(t), Y_i(t), G_i^T(t), \Lambda_i(t), A(t) = \text{const})$  — показатель эффективности работы  $i$ -го энергоблока.

Разработанный на базе описанной имитационной модели энергоблоков АЭС автоматизированный комплекс программ для расчетов энергоблоков с ВВЭР-1000 имеет блочную (модульную) структуру с иерархическим подчинением (рис. 2).

Эксперимент на имитационной модели энергоблока с ВВЭР-1000 и обработка полученных данных позволили построить зависимости вида (2) — модели интегральных эксплуатационных характеристик:

1) функциональную зависимость электрической мощности энергоблока от изменений в процессе эксплуатации параметров основного и вспомогательного оборудования:

$$N = N_0 - \Delta N(\Delta \bar{X}, \Delta \bar{X}_K, \Delta \bar{X}_T, \Delta \bar{X}_{PG1}, \Delta \bar{X}_{PG2}, \Delta \bar{X}_{PG3}, \Delta \bar{X}_{PG4}), \quad (4)$$

где  $N_0$  — электрическая мощность, производимая турбоустановкой при  $1,0 \bar{D}$  ( $\bar{D} = D/D_0$  — относительная паропроизводительность;  $D$  — расход свежего пара на исследуемом режиме;  $D_0$  — расход свежего пара на номинальном режиме);  $\Delta \bar{X} = (\Delta X_1, \dots, \Delta X_p)$  — вектор отклонений тепловых и гидравлических параметров проточной части турбины, системы сепарации и промежуточного перегрева пара, системы регенеративного подогрева питательной воды от номинальных значений;  $\Delta \bar{X}_K$  — вектор отклонений параметров конденсатора от номинальных значений;  $\Delta \bar{X}_T$  — вектор отклонений параметров системы теплофикации;  $\Delta \bar{X}_{PGi} = (\Delta t'_i, \Delta t_{PV}, \Delta p_2, \Delta p_1)$  — вектор отклонений параметров (температуры и давления теплоносителя и рабочего вещества)  $i$ -го парогенератора ( $i = 1, \dots, 4$ );

2) функциональную зависимость удельного расхода теплоты энергоблока от изменения в процессе его эксплуатации параметров основного и вспомогательного оборудования:

$$q = q_0 - \Delta q(\Delta \bar{X}, \Delta \bar{X}_K, \Delta \bar{X}_T, \Delta \bar{X}_{PG1}, \Delta \bar{X}_{PG2}, \Delta \bar{X}_{PG3}, \Delta \bar{X}_{PG4}), \quad (5)$$

где  $q_0$  — удельный расход теплоты при  $1,0 \bar{D}$ .

Полученные модели интегральных эксплуатационных характеристик позволяют оценивать влияние различных факторов на эффективность работы энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000: изменений тепловых и гидравлических параметров теплоносителей и рабочих веществ основного и вспомогательного оборудования, энергосистемных параметров, климатических условий (температуры охлаждающей воды, температуры окружающего воздуха). Эти модели применяются для решения задач оптимального

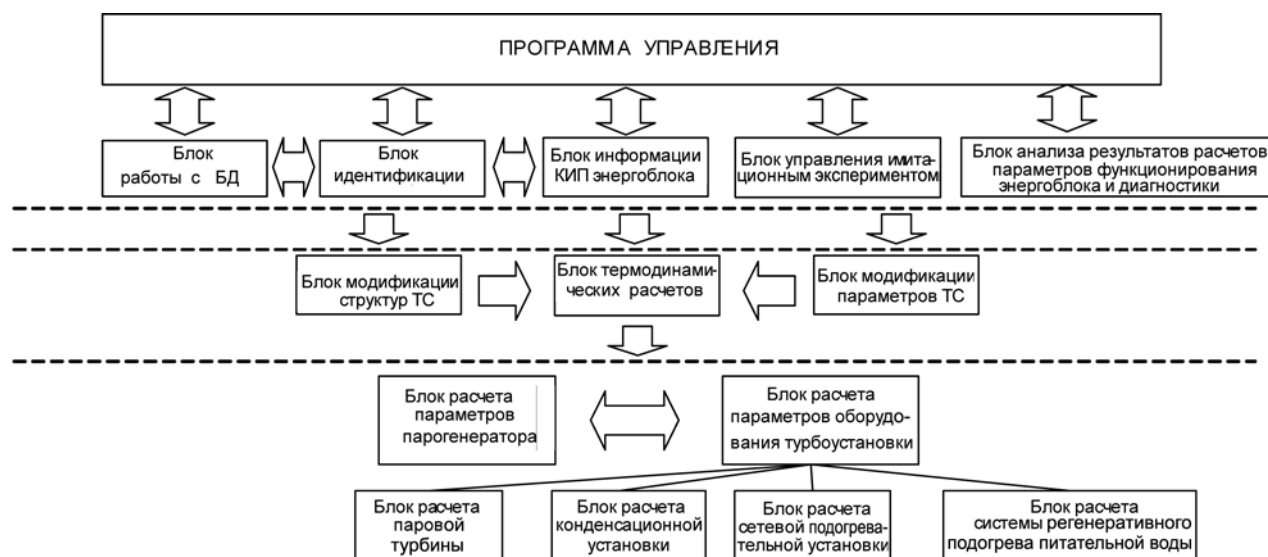
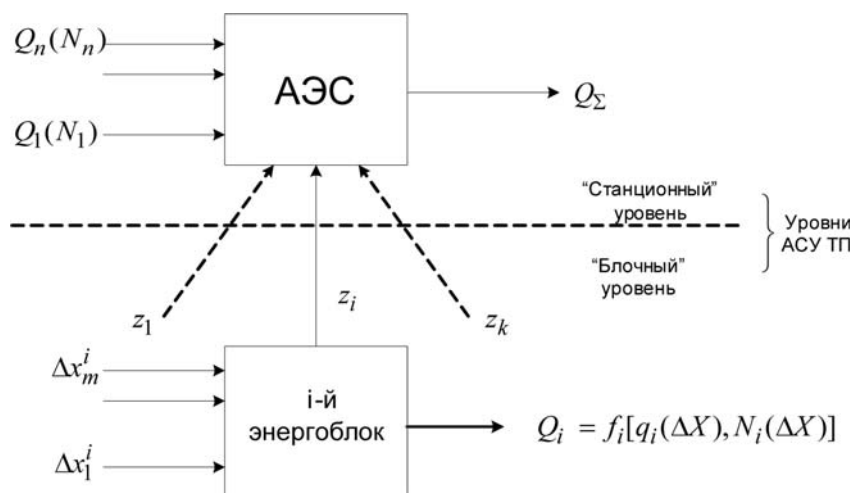


Рис. 2. Структура автоматизированного комплекса программ, реализующего имитационную модель энергоблока АЭС

Рис. 3. Структура и взаимосвязь математических моделей для расчета расхода теплоты энергоблоков АЭС:  
 $\Delta x_j^i, Q_i$  — входные и выходные величины «блочного» уровня АСУ ТП;  
 $z_1, \dots, z_i, \dots, z_k$  — информационные каналы связей между уровнями АСУ ТП;  
 $Q_1(N_1), \dots, Q_n(N_n), Q_\Sigma$  — входные и выходные величины «станционного» уровня АСУ ТП



распределения нагрузок между энергоблоками электростанций (3). Взаимосвязь между моделями эксплуатационных характеристик (2) каждого энергоблока и решением задачи оптимального распределения нагрузок между энергоблоками (3) показана на рис. 3.

Эксплуатационные характеристики энергоблока АЭС позволяют представить расход теплоты по отдельному  $i$ -му энергоблоку в виде функции отклонений параметров энергетического и тепломеханического оборудования от номинальных значений  $Q_i = Q_i(\Delta X)$ . При решении задачи распределения нагрузок между энергоблоками данную зависимость можно рассматривать как математическую модель  $Q_i = Q_i(N_i)$  с одним основным управляемым параметром — электрической мощностью  $N_i$  при известных фактических значениях других параметров  $\Delta X$ . Такой подход позволяет, используя иерархический принцип организации управления атомной электростанцией, передавать на верхний уровень только те информационные сигналы, которые связаны с определением целевой функции этого уровня [4].

Особенностью задачи распределения нагрузок между энергоблоками АЭС является тот факт, что расход теплоты любого энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 зависит только от мощности рассматриваемого блока вследствие отсутствия поперечных связей между моноэнергоблоками АЭС этого типа. Таким образом, данная задача — задача нелинейного программирования с линейными ограничениями и сепарабельной целевой функцией. В качестве достаточно эффективного метода решения задачи такого класса может быть использован метод проекции градиента [5].

## Выводы

Представленные в работе методы и модели позволяют, учитывая реальное состояние оборудования энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 в процессе их эксплуатации, решать задачу выбора оптимальных стратегий при управлении режимами работы энергоблоков АЭС, в частности задачу автоматизации процесса управления распределением нагрузок между ними, с целью повышения за счет этого маневренности, надежности и среднеэксплуатационной тепловой экономичности АЭС.

## Список литературы

1. Потанина Т. В. Алгоритмізація та програмування розрахунку горизонтального парогенератора для імітаційної моделі енергоблока АЕС з ВВЕР-1000 / Т. В. Потанина, О. В. Єфімов, О. Д. Меньшикова, Т. А. Гаркуша // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація». — Львів: НУ «Львівська політехніка», 2006. — № 561. — С. 3–7.
2. Палагин А. А. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок / А. А. Палагин, А. В. Ефимов, Е. Д. Меньшикова. — К.: Наук. думка, 1991. — 201 с.
3. Ефимов А. В. Анализ функционирования энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 на основе имитационного моделирования / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина // Электронное моделирование. — 2007. — Т. 29. — № 1. — С. 115–120.
4. Плетнев Г. П. Методы моделирования распределенных систем управления технологическими процессами энергоблоков ТЭС / Г. П. Плетнев // Теплоэнергетика. — 2001. — № 10. — С. 49–52.
5. Potanina T. Problem of optimal load distribution between power units on the power stations / T. Potanina, A. Efimov // MOTROL—Lublin. — 2009. — Vol. 11 A. — P. 25–30.

Надійшла до редакції 16.06.2010.